

BRIEFINGS DE L'IFRI

Centre Énergie & Climat

ifri 40 depuis 1979

04 FÉVRIER 2022

La géo-ingénierie à la rescousse du climat ?

Enjeux, acteurs et perspectives d'un symbole de l'Anthropocène

Gwenolé MOAL

Points clés

- **La géo-ingénierie est un mot-valise regroupant un panel de techniques très variées, mais elle devient un enjeu international qui grandira à mesure notamment que les coûts de certaines technologies baisseront ou que les émissions de gaz à effet de serre n'entameront pas le déclin nécessaire, renforçant l'attrait de ces techniques.**

- **Pour l'instant, la portée de la géo-ingénierie est infime. Les ordres de grandeur des techniques sont bien inférieurs à ceux des problèmes et les coûts, rédhibitoires.**

- **Les multiples incertitudes ne permettent pas de définir clairement si un recours massif à la géo-ingénierie serait positif ou négatif sur la situation climatique actuelle.**

- **L'absence de réglementations contraignantes et d'une gouvernance internationale est problématique alors que des expérimentations ont déjà lieu et pourraient changer d'échelle. L'Union européenne devrait entamer un mouvement de fond sur la gouvernance et l'encadrement d'un sujet risqué et déjà partiellement installé, qui concerne de nombreux domaines, dont les océans.**

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.com

Introduction

L'échelle globale et l'intentionnalité de l'action sont les deux piliers de la géo-ingénierie, qui regroupe « un vaste ensemble de méthodes et de techniques visant à modifier délibérément le système climatique pour lutter contre les effets du changement climatique[1] ». Si la géo-ingénierie n'est pas nouvelle, succédant aux recherches climatiques menées pendant la guerre froide, son intégration dans le 5e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, AR5, 2014) a opéré un réel coup de projecteur sur le sujet. Les alertes de plus en plus alarmistes sur le climat et les objectifs toujours plus ambitieux laissent une place croissante aux projets de géo-ingénierie, principalement les projets de capture du dioxyde de carbone (CDR : *Carbon Dioxide Removal*[2]). Malgré cela, le sujet reste peu connu du grand public. Ce *Briefing* en dresse un état des lieux, montre le potentiel de tensions qui en découle, et alerte sur l'absence de gouvernance internationale alors que se tiendra prochainement le One Ocean Summit.

La géo-ingénierie englobe une large variété de techniques

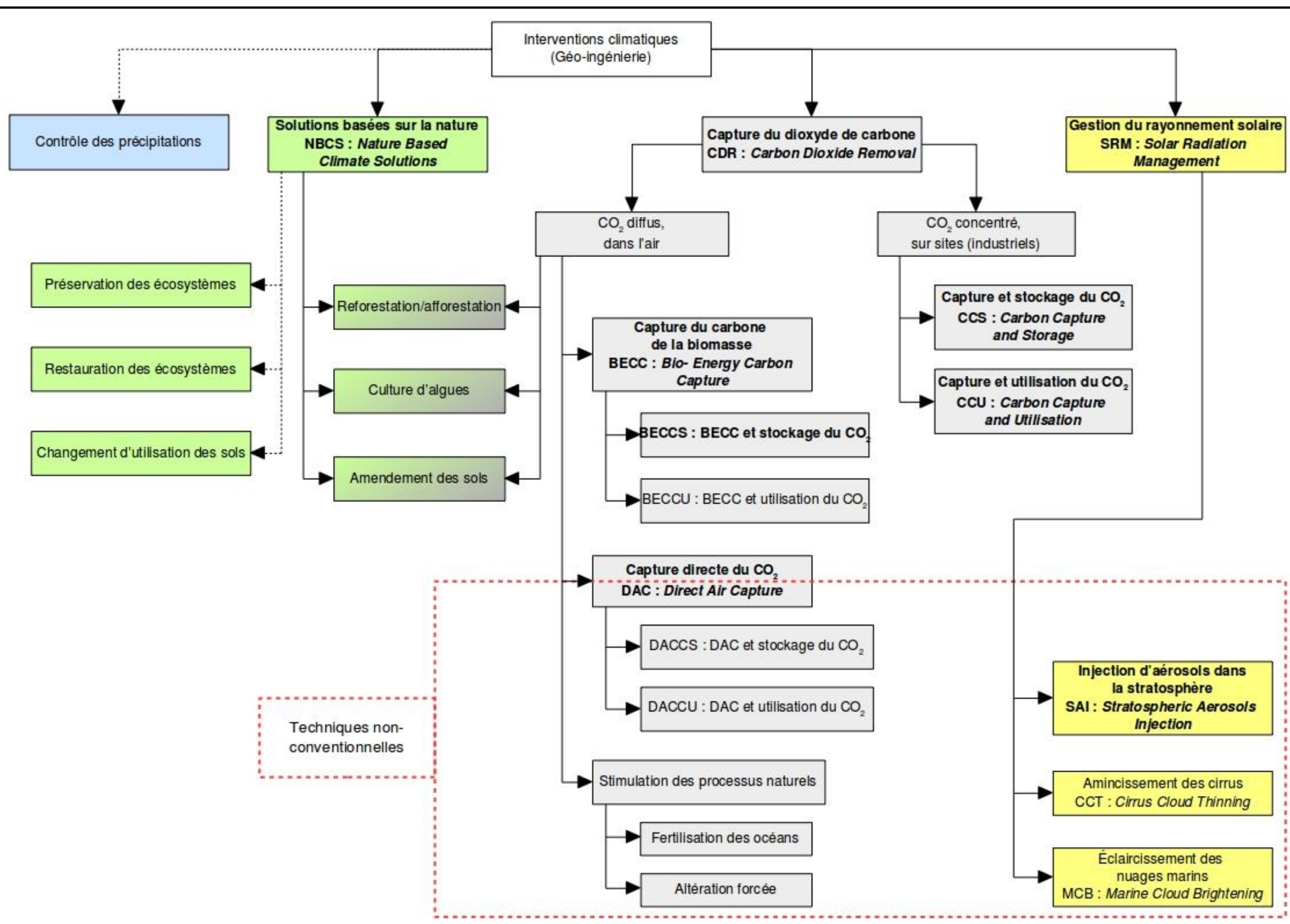
Le panel de techniques regroupées sous le nom de géo-ingénierie est représenté (de manière non exhaustive) sur le schéma ci-après. La multitude et la diversité des techniques, tant par leurs objectifs que par leur nature, soulignent un besoin de précision que n'offre pas le nom générique de géo-ingénierie. Son utilisation doit donc se faire avec précaution et d'autres termes plus précis, comme *a minima* les noms des catégories, lui être préférés. L'alternative « interventions climatiques » sera employée autant que possible dans ce document.

Dans les scénarios du GIEC comme dans ceux de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie[3] (ADEME), les déploiements technologiques de solutions de capture du CO_2 dans le but d'atteindre la neutralité carbone varient selon la vitesse de réduction des émissions et la préservation des puits de carbone naturels. Seules certaines solutions sont considérées : la capture du CO_2 sur sites industriels (CCS/CCU) ou sur certaines centrales de bioénergie (BECC), et les techniques basées sur la nature (NBCS). Les incertitudes sur les conséquences et le manque de maturité empêchent d'évaluer le rôle potentiel des autres techniques, classées comme non conventionnelles. La capture directe du Co_2 (DAC) occupe une place particulière : le manque de maturité des

1. « Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », Genève, GIEC, 2014.
2. La littérature anglophone étant plus abondante sur le sujet, ce sont les abréviations anglaises qui seront principalement utilisées dans ce document.
3. Voir : https://transitions2050.ademe.fr.

technologies utilisées le catégorise comme non conventionnel, mais la multiplicité des projets de recherche et de déploiement le tire vers les techniques conventionnelles.

Schéma des différentes techniques d'interventions climatiques regroupées sous le terme de géo-ingénierie



Note : Les couleurs distinguent les catégories (objectifs). Les abréviations utilisées dans la suite de l'article sont surlignées en gras.

Source : schéma réalisé par l'auteur, d'après : « Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », Genève, GIEC, 2014 ; « Interventions sur le climat : état des lieux des initiatives aux États-Unis », Rapport d'ambassade, Ambassade de France aux États-Unis, juillet 2021, disponible sur : https://france-science.com.

La plupart des techniques visent à capturer du dioxyde de carbone (CDR) mais elles sont encore extraordinairement chères et peu efficaces. La capture du CO_2 atmosphérique est complexe à cause de sa faible concentration. Elle est réalisée par un phénomène de sorption pour la DAC, et par les végétaux (*via* la photosynthèse) pour la capture du carbone et de la biomasse (BECC). Le CO_2 est ensuite compressé, puis stocké ou utilisé. La BECC peut être déployée à visée énergétique avec un ajout de capture et stockage du CO_2 (CCS) ou à visée de décarbonation avec des cultures spécifiques. La CCS et la capture et utilisation du CO_2 (CCU) classiques ne seront pas traitées dans ce document.

Les bénéfices et la catégorisation des techniques de solutions basées sur la nature (NBCS) dépendent de la manière dont elles sont réalisées. La restauration d'une forêt diversifiée, imitant la nature et permettant de bénéficier d'un ensemble de services écosystémiques, se distinguera par exemple d'une reforestation en monoculture industrielle. Celle-ci relèvera de la géo-ingénierie, ayant pour but principal (voire unique) de capturer du CO_2. Il s'agit d'une technique intermédiaire entre NBCS et CDR.

Du côté des techniques non conventionnelles, on retrouve principalement la gestion du rayonnement solaire (SRM) et la fertilisation des océans. Celle-ci consiste à augmenter la pompe biologique océanique du carbone en suppléant au facteur limitant du développement phytoplanctonique, le fer. Les résultats très incertains et les échecs de plusieurs essais réalisés ont freiné le développement de cette technique.

Le contrôle des précipitations est une catégorie à part

La SRM est une catégorie d'interventions climatiques qui se décline en plusieurs techniques ayant pour objectif la manipulation intentionnelle du bilan radiatif de courtes longueurs d'onde à la surface terrestre afin de réduire le réchauffement global. Les techniques dans l'espace et au sol ont été écartées en raison de leurs contraintes techniques ou d'échelle. Dans l'atmosphère, trois subsistent : l'amincissement des cirrus (en accélérant leur cycle de précipitation) ; l'éclaircissement des nuages marins (en y projetant des sels) ; et enfin l'injection d'aérosols stratosphériques. Cette dernière technique, qui tire son inspiration des éruptions volcaniques, est l'une des plus simples à mettre en œuvre, l'une des moins coûteuses… et l'une des plus problématiques.

Le contrôle des précipitations est une catégorie à part, car il s'agit de phénomènes météorologiques (immédiats et locaux) et non climatiques (à long terme et globaux). Cependant, de vastes programmes de contrôle des précipitations ont été entrepris, initiant un changement d'échelle majeur. La Chine ambitionne de réguler les précipitations sur 5,5 millions de kilomètres carrés (km^2), soit 10 fois la France métropolitaine), dont le plateau tibétain, qui est un endroit clé du régime hydrologique de l'Asie du Sud-Est et

notamment de la mousson[4]. Outre ce changement d'échelle, les débats sur les interventions climatiques risquent d'être influencés par cette catégorie de techniques, similaires et déjà utilement employées dans de nombreux pays (agriculture).

Des risques et limites multiples

Les soutiens de la géo-ingénierie mettent en avant trois arguments principaux : la lutte contre le réchauffement climatique ; la temporisation du réchauffement, en attendant la mise en place de mesures d'atténuation et d'adaptation et pour compenser leur lenteur ; la nécessité en cas d'emballement soudain du système climatique. Si les soutiens de la recherche souhaitent surtout mieux comprendre les systèmes et les enjeux associés, ceux d'éventuels déploiements (décideurs, industriels) sont plutôt attirés par la promesse de poursuite du modèle économique et social actuel, du maintien à l'identique de l'organisation de la société et des comportements, et par les possibilités de croissance économique à court terme.

Les risques et limites sont nombreux. La multiplicité et l'importance des sources d'incertitudes quant aux systèmes ciblés à moyen et long terme, notamment les boucles de rétroaction, ne permettent pas de déterminer si un déploiement massif aurait un impact positif ou négatif sur la situation climatique actuelle[5].

Le manque de maturité des technologies reste important, par exemple au niveau des ordres de grandeur ou du taux de retour carboné (CROI). Inspiré du taux de retour énergétique (EROI), le CROI permet d'évaluer la quantité de gaz à effet de serre (GES) capturée par un système par rapport aux émissions engendrées par son existence et son fonctionnement. Une étude a abouti à un CROI compris entre 1,2 et 10 pour la DAC, et d'environ 9 pour la BECCS[6]. La question sous-jacente porte sur la consommation énergétique des technologies, à la fois quantitativement et qualitativement (type d'énergie nécessaire), qui influe sur leur intérêt et leur potentiel de déploiement. Les NBCS, qui ne nécessitent ni intrants énergétiques ni systèmes industriels, présentent de meilleurs CROI.

La CDR est représentative de la soutenabilité faible[7]. Elle est principalement motivée par les marchés de crédits carbone : là où la finance devrait être un outil incitatif,

4. B. Mao, « La Chine accélère son programme d'ensemencement des nuages », *Usbek et Rica*, 16 décembre 2020, disponible sur : https://usbeketrica.com.
5. IPCC, « Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », Cambridge University Press, 2014, p. 219.
6. U. Singh et L. M. Colosi, « The Case for Estimating Carbon Return on Investment (CROI) for CCUS Platforms », *Applied Energy*, 1er mars 2021, disponible sur : https://doi.org.
7. Dans la soutenabilité faible, les capitaux naturels peuvent être substitués par des capitaux artificiels. L'économie, la société et l'environnement sont distincts et au même niveau, avec le développement durable à leur intersection. Dans la soutenabilité forte, les capitaux ne sont pas substituables entre eux. L'économie est incluse dans la société, elle-même incluse dans l'environnement. Voir : I. Morandin-Ahuerma *et al.*, « Socio-Ecosystemic Sustainability », Sustainability, 17 juin 2019, disponible sur : https://doi.org.

elle est considérée comme une fin en soi et éclipse les objectifs climatiques. La diminution de la concentration atmosphérique de CO_2 souvent mise en avant n'existe que rarement dans les faits : le CO_2 capturé est majoritairement utilisé, donc réémis. Les besoins en ressources (métalliques, énergétiques et aquatiques notamment) et les tensions les accompagnant, négligés, s'ajoutent aux problématiques classiques de la CCUS. Les cultures pour la BECC font, elles, face à une problématique de concurrence d'usage des sols, et doivent être réalisées avec un système agricole lui-même soutenable.

Du côté des techniques impliquant les océans, la problématique principale est le risque de désoxygénation (zones mortes), pour les eaux profondes comme de surface. La culture d'algues et le développement des herbiers marins peuvent être intéressants si les cultures sont raisonnées, durables, et que plusieurs services écosystémiques sont visés. La concurrence d'usage des nutriments avec le secteur agricole et leur production polluante et énergivore peut être un frein. Les incertitudes sur le devenir du CO_2 capté et sur sa durée de stockage peuvent être contrebalancées par des récoltes, mais qui sont techniquement complexes. Un risque non négligeable d'effet rebond plane sur les potentielles utilisations de ce CO_2. La régulation et l'équilibre des paramètres pour s'assurer que ce sont les espèces ciblées qui croissent d'une manière optimale induisent un besoin élevé d'interventions, en lac comme dans les océans. Le meilleur moyen d'augmenter la capture de CO_2 par les écosystèmes aquatiques reste la réduction des activités humaines les impactant (principalement la pêche[8]).

La culture d'algues et le développement des herbiers marins peuvent être intéressants

Le principe même de la SRM est extrêmement problématique. Le rayonnement solaire est à l'origine de tous les grands cycles terrestres (hydrologique, photosynthétique, etc.). Sa modification engendrerait des conséquences majeures, et variables régionalement. Le décalage spatial entre le déploiement et les conséquences est aussi une source potentielle de conflits interétatiques. Surtout, la SRM engendrerait un phénomène de dépendance une fois déployée : en cas d'arrêt, le bilan énergétique réaugmenterait soudainement alors que le taux de GES aurait continué à augmenter, entraînant un réchauffement abrupt. Certaines problématiques sont plus spécifiques : zones restreintes de déploiement (présence de cirrus nécessaire), impacts sur les autres limites planétaires (ozone stratosphérique et quantité d'aérosols pour l'injection d'aérosols dans la stratosphère – SAI), etc.

8. C. Hamilton, *Les Apprentis sorciers du climat. Raisons et déraisons de la géo-ingénierie*, Paris, Le Seuil, coll. Anthropocène, 10 octobre 2013.

Une dynamique partagée entre public et privé

De nombreux États mènent des recherches et émettent des financements dans le domaine des interventions climatiques (Chine, Russie, Allemagne, Inde[9]…). Les financements étatiques sont essentiels mais parfois critiqués car il s'agit d'autant de fonds indisponibles pour les mesures d'atténuation. En France, la conclusion de l'Atelier de réflexion prospective de 2014 allait à l'encontre des projets de géo-ingénierie[10]. Depuis, seules les techniques de CDR ont été approfondies. La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) estime dans son scénario de référence que la BECCS pourrait être à l'origine d'une dizaine de millions de tonnes de CO_2 par an ($MtCO_2$/an) d'émissions négatives. Les incertitudes l'entourant sont soulignées, et les autres technologies de CDR écartées par manque de maturité. Les États-Unis, deuxième émetteur de GES du monde, sont un des leaders dans le domaine. L'objectif du gouvernement Biden d'une neutralité carbone en 2050 nécessite une mobilisation massive des acteurs, publics comme privés. Pour cela, de nombreux financements ont été proposés, que ce soit dans l'*Energy Act of 2020*, le budget de 2022 ou l'*Infrastructure Plan*. Ces financements, cumulant au total plusieurs milliards de dollars, englobent des appels à projets, des incitations fiscales (comme le crédit d'impôt 45Q), ou encore des subventions directes (infrastructures de transport du CO_2, etc.). L'intérêt et les financements portent principalement sur les techniques de CDR, plus marginalement sur la NBCS et très peu sur la SRM, bien que l'Académie des sciences ait appelé en mars 2021 à augmenter les budgets de recherche pour la SRM[11].

Les armées montrent un intérêt croissant pour le réchauffement climatique et les liens avec la sécurité nationale. Les dérives potentielles de certaines technologies d'interventions climatiques en armes climatiques en font des enjeux probablement étudiés. Certaines universités ont également des programmes de recherche exclusivement dédiés à la géo-ingénierie, comme Oxford ou Harvard. La société civile est peu informée des techniques et avancées dans ce domaine. Globalement, elle est opposée à la SRM, comme l'illustre l'annulation en mars dernier d'une étape du projet de SAI *ScoPEx* suite à une mobilisation à son encontre[12]. Des *think tanks* et autres instituts s'intéressent à ce sujet, ainsi que

Les armées montrent un intérêt croissant pour le réchauffement climatique et les liens avec la sécurité nationale

9. M. Grise *et al*, « Climate Control: International Legal Mechanisms for Managing the Geopolitical Risks of Geoengineering », RAND Corporation, 2021, disponible sur : www.rand.org.
10. R. Briday, « Qui alimente les études sur la géo-ingénierie ? Une perspective d'historien des sciences », *Natures Sciences Sociétés*, 2014, disponible sur : www.cairn.info.
11. « Interventions sur le climat : état des lieux des initiatives aux États-Unis », *op. cit*.
12. H. Dunleavy, « An Indigenous Group's Objection to Geoengineering Spurs a Debate about Social Justice in Climate Science », *Inside Climate News*, 7 juillet 2021, disponible sur : https://insideclimatenews.org.

certaines organisations non gouvernementales (ONG), dont la canadienne ETC Group.

L'attrait technologique et le prolongement du système actuel que promettent les interventions climatiques intéressent de nombreux financeurs privés. Des grosses fortunes, principalement issues de la Silicon Valley ou de l'industrie des énergies fossiles, apportent des capitaux, souvent *via* des fondations. En étant présent dans le capital des plus grandes entreprises du domaine (Climeworks, Carbon Engineering, Intellectual Ventures, Silver Lining…), Bill Gates est de loin le plus actif dans ce domaine. Certains grands groupes industriels s'impliquent également, eux aussi *via* des fondations (Apple) ou directement. Occidental Petroleum s'est ainsi associé à Carbon Engineering pour un projet de DAC. Prévu pour 2023, il aura une capacité de capture de 1 MtCO_2/an, soit 100 fois le potentiel actuel (0,1 MtCO_2/an répartis sur une quinzaine de sites). Le CO_2 capté devrait servir à la récupération assistée de pétrole[13]. Le projet Orca, situé en Islande, rassemble Climeworks et Carbfix et constitue le plus gros site de DAC en fonctionnement. Récemment inauguré, il occupe le devant de la scène, occultant ainsi les problématiques sous-jacentes au CDR et aux interventions climatiques en général. Malgré sa taille très limitée (10 ktCO_2/an, soit l'empreinte carbone d'un millier de Français en moyenne, en équivalent CO_2), il suscite un fort engouement, jusqu'au sein de l'Union européenne qui lui a octroyé un financement en 2017 pour de la documentation sur les potentiels de déploiement similaires en Europe[14]. Microsoft compte aussi sur la technologie de DAC de Climeworks pour atteindre ses objectifs climatiques, avec un budget de 1 milliard de dollars. Concernant la BECC, il y avait cinq installations dans le monde en 2019, pour une capacité de capture de 1,5 MtCO_2/an. L'usine de bioéthanol d'ADM, dans l'Illinois, est le seul site où le carbone capturé est stocké.

Bill Gates est de loin le plus actif dans ce domaine

Une absence problématique de réglementation

La gouvernance de la géo-ingénierie est extrêmement complexe en raison de sa globalité et de la diversité de ses enjeux (scientifiques, économiques, politiques, éthiques). Il n'y a aucune réglementation dans ce domaine. Des structures existent, comme la Convention sur la modification de l'environnement (ENMOD) ou la Convention sur la diversité biologique (CDB), mais elles ne sont pas ratifiées par tous les États et ne sont pas contraignantes tant qu'elles ne sont pas retranscrites dans les législations nationales. Les termes très vagues utilisés dans les textes laissent libre cours à l'interprétation et aux contournements. Les systèmes ciblés par les interventions climatiques sont communs à tous les pays, comme les enjeux, risques et bénéfices

13. « Direct Air Capture – Analysis », IEA, juin 2020, disponible sur : www.iea.org.
14. « Upscaling and Optimizing Subsurface, *in situ* Carbon Mineralization as an Economically Viable Industrial Option », Commission européenne, CORDIS, disponible sur : https://cordis.europa.eu.

potentiels. Il y a donc une opportunité de coopération internationale afin d'arriver à un consensus, mais celui-ci est déjà difficile à atteindre à l'échelle nationale. Les positions distinctes des ministères allemands de l'Environnement et de la Recherche par rapport à l'expérience de fertilisation des océans LohaFex, menée en 2009, l'illustrent bien[15]. Les États-Unis, le Brésil et l'Arabie Saoudite se sont opposés en 2019 à une résolution des Nations unies demandant un simple état des lieux des recherches et des résolutions existantes au sein des instances onusiennes[16]. Un consensus international semble donc peu probable à court terme.

La polarisation du monde, et principalement la rivalité sino-américaine, ne favorise pas l'évolution vers un consensus international. La course à la technologie, si elle englobe les interventions climatiques, pourrait déboucher sur une course au contrôle du climat, enjeu stratégique de premier plan. Les risques d'expérimentations à grande échelle (soit l'équivalent de déploiements) seraient démultipliés, sans considération pour la globalité des impacts ni pour les potentiels effets d'entraînement. La tentation de déploiements hâtifs de manière unilatérale sera de plus en plus forte au fur et à mesure de l'avancée des changements climatiques, par exemple pour faire face à des événements extrêmes et des difficultés croissantes impactant le secteur agricole. Un accroissement des tensions interétatiques lié à ces enjeux semble donc probable.

La course à la technologie […] pourrait déboucher sur une course au contrôle du climat

Ces expérimentations pourraient aussi être le fait du secteur privé, qui se développe bien plus vite que la réglementation. Son lobbying puissant influence déjà fortement les débats. Il pourrait lever assez de capitaux pour lancer des expérimentations de sa propre initiative, à l'instar d'expériences passées ou du domaine du spatial.

La présidence française de l'Union européenne, une opportunité à saisir

Les océans et le système climatique sont des éléments vitaux pour l'ensemble des êtres vivants. Pourtant ni la haute mer, qui représente 60 % des océans, ni les techniques d'interventions climatiques ne sont réglementées à ce jour.

Le concept de « communs », popularisé par Elinor Ostrom, est défini comme une ressource partagée, gérée collectivement par une communauté selon un ensemble de règles qu'elle définit elle-même. Dans le cadre de la géo-ingénierie, si la ressource (le système climatique) et la communauté (la population humaine) sont bien présentes,

15. C. Greuet et F. Leclerc, « Si vous ne vous intéressez pas à la géo-ingénierie, c'est la géo-ingénierie qui s'intéressera à vous », Slate, 1er juin 2014, disponible sur : www.slate.fr.
16. J. Chemnick, « U.S. Blocks U.N. Resolution on Geoengineering », *Scientific American*, 15 mars 2019, disponible sur : www.scientificamerican.com.

les règles sont pour l'instant absentes. S'inspirer des communs permettrait notamment de pallier l'absence de démocratie qui règne dans ce domaine.

Un contrôle des recherches et des déploiements semble compliqué à mettre en œuvre en l'absence de cadre réglementaire, mais laisser la situation évoluer d'elle-même sans règles ni périmètre revient à avaliser les potentielles catastrophes pouvant en découler et à laisser le champ libre aux expérimentations, au chemin de dépendance et au verrouillage technologique. La priorité devrait donc être la création d'un dialogue international inclusif et transparent en vue de l'élaboration d'une réglementation claire, contraignante et valable pour tous les acteurs.

Le One Ocean Summit, qui se tiendra du 9 au 11 février 2022 à Brest, a pour but de renforcer la protection des océans. Bien que les discussions à cet égard soient plus anciennes que celles de la géo-ingénierie, la problématique est commune. Les océans sont concernés par les techniques d'intervention sur le climat, de manière directe ou indirecte, et leur protection passera forcément par un encadrement réglementaire de celles-ci. La France pourrait se positionner comme leader mondial dans ce domaine, en initiant des discussions et des travaux de réglementation à l'échelle nationale et européenne afin d'être en mesure, avec ses partenaires, d'appuyer le sujet dans les instances du G20 et des Nations unies.

L'actuelle présidence française de l'Union européenne est une opportunité pour entamer un mouvement de fond sur la gouvernance et l'encadrement d'un sujet risqué et déjà partiellement installé.

Gwenolé Moal *est en fin de cursus d'ingénieur en énergie et matériaux pour l'environnement, et de master en environnement et développement durable. Il s'intéresse aux problématiques contemporaines principalement sous les angles de l'écologie, de l'énergie et de la technique. Actuellement en stage de fin d'études, il travaille sur la stratégie globale de confort thermique pour un collectif d'habitants engagés dans une démarche de transition écologique.*

Comment citer cette publication :

Gwenolé Moal, « La géo-ingénierie à la rescousse du climat ? Enjeux, acteurs et perspectives d'un symbole de l'Anthropocène », *Briefings de l'Ifri*, Ifri, 4 février 2022.

ISBN : 979-10-373-0475-9

Les opinions exprimées dans ce texte n'engagent que la responsabilité de l'auteur.

© Tous droits réservés, Ifri, 2022

Couverture : © Walter Bieri/EPA/Shutterstock.com



27 rue de la Procession
75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org

